

# 改进 TOPSIS 方法在大气环境质量评价中的应用<sup>\*</sup>

王玲玲<sup>1,2</sup> 卢晓宁<sup>1,2</sup> 孙志高<sup>3</sup>

(1. 成都信息工程学院 资源环境学院, 成都 610225; 2. 成都理工大学 国土资源部地学空间信息技术重点实验室, 成都 610059;  
3. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

**摘要:** 为了更科学合理的进行大气环境质量综合评价, 基于 TOPSIS 模型, 采用加权法判定评价指标权重以避免主观定权的随意性, 并引入“垂面距离”的方法计算评价对象与最优解之间接近程度, 克服传统方法中评价对象可能离最优解“欧氏距离”近的同时离最劣解“欧氏距离”也近的不足, 从而合理判定区域大气环境质量是否达到评价标准。研究表明: 改进的 TOPSIS 方法与其他方法的评价结果完全一致, 说明该评价方法适用于大气环境质量评价并且评价结果客观准确。

**关键词:** TOPSIS; 大气环境质量; 垂面距离; 综合评价

DOI: 10.13205/j.hjgc.201409032

## APPLICATION OF IMPROVED TOPSIS IN ATMOSPHERIC ENVIRONMENTAL QUALITY ASSESSMENT

Wang Lingling<sup>1,2</sup> Lu Xiaoning<sup>1,2</sup> Sun Zhigao<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;  
2. Ministry of Land and Resources Key Laboratory of Geological Spatial Information Technology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

**Abstract:** In order to comprehensive evaluate atmospheric environmental quality scientifically, the weight of the indicator was determined by the method of Weighted. “Vertical distance” method was proposed to assess the degree of closeness between optimal solution and the inferior solution based on the traditional TOPSIS method to overcome defects that “Euclid distance” of the evaluation object closed to negative-ideal solution and ideal solution concurrently. It could reasonably determine the standard of atmospheric quality. The results indicated that the evaluation results of the improved TOPSIS method was objective and exactly the same as other methods. So this valuation methodology was suitable for atmospheric environment quality assessment.

**Keywords:** TOPSIS; atmospheric environmental quality; vertical distance; comprehensive assessment

## 0 引言

近年来, 我国区域性大气环境污染问题频频发生且呈现出复合型污染特征, 成为当前亟待解决的重大环境问题<sup>[1-2]</sup>。大气环境质量评价<sup>[3]</sup>是规划和管理一定区域空气质量达标状况的基础, 依据原则和评价标准, 以若干大气环境影响因子的监测资料为基

础, 通过评价方法对某一区域的大气环境质量进行定性或定量的评估<sup>[4-5]</sup>, 从而准确得知空气质量状况和污染现状。

目前国内外已提出多种大气环境质量评价方法, 主要有层次分析法<sup>[6]</sup>、BP 神经网络法<sup>[7]</sup>、模糊综合评价法<sup>[8]</sup>、灰色聚类法<sup>[9]</sup>、集对分析法<sup>[10]</sup>等, 但每种评价模型都有自身的优点和不足。TOPSIS 分析法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 对样本数目和分布、评价指标多少和种类无严格限制, 具有普适性、计算量小、几何意义直观以及

<sup>\*</sup> 四川省教育厅项目 (13ZA0092); 国土资源部地学空间信息技术重点实验室开放基金 (KLGST2014-8); 国家自然科学基金 (41171424, 41371104); 中国科学院人才专项 (Y129091041)。

收稿日期: 2013-10-27

信息失真小等特点<sup>[11]</sup>,多用于水环境质量综合评价<sup>[12]</sup>、土地利用结构合理性评价以及经济综合实力评价等领域。在大气环境质量综合评价中鲜见报道。因此本文尝试基于 TOPSIS 评价模型,采用客观定权法确定评价指标权重,并应用“垂面距离”解决传统模型评价指标的“欧氏距离”可能与正理想解近同时与负理想解也近的不足,评价大气环境质量的优劣程度<sup>[13]</sup>,以期为大气环境质量综合评价提供一种新方法。

## 1 评价方法

### 1.1 TOPSIS 方法

TOPSIS 法是理想值逼近排序法,即基于“正理想解”与“负理想解”进行优先排序的方法<sup>[14]</sup>。该方法是 Hwang 和 Yoon 于 1981 年提出的适用于有限方案多目标决策的综合评价分析方法<sup>[15]</sup>。TOPSIS 分析法在充分利用监测数据的情况下,通过对样本数据进行归一化处理,消除不同指标量纲的影响,然后在确定各项指标正理想值和负理想值后,求出各个方案与正理想值、负理想值之间的加权欧氏距离,由此得出各评价指标与最优方案的接近程度。

### 1.2 传统 TOPSIS 方法的不足

从传统 TOPSIS 法的排序决策步骤可知, TOPSIS 法存在如下的缺点: 1) 标准决策矩阵计算比较复杂,不易求出正理想解和负理想解; 2) 权重值通常是事先主观判定,具有一定的随意性; 3) 当两个评价影响因子关于正理想解和负理想解的连线对称时,与正理想解欧氏距离近的数据可能与负理想解的距离也近<sup>[16-17]</sup>,因此可能无法合理比较这两个评价影响因子的优劣程度。

### 1.3 改进的 TOPSIS 方法

#### 1.3.1 基于“垂面距离”的 TOPSIS 方法

假设有  $x, y, z$  3 个评价指标,点 C 和点 D 分别为样本点,  $M$  是评价方案所得到的正理想解向量,  $N$  是评价方案所得到的负理想解向量。这里分别过点 C、点 D 作垂直于 MN 的垂线,垂足为 E 和 F。将点 C 逐渐向点 E 靠近的过程中,点 C 逐渐贴近  $M$  的同时也逐渐贴近  $N$ ,同理 D 到 F 的贴近结果也是如此。由此可知,运用传统 TOPSIS 方法的“欧氏距离”计算贴进度可能得不到合理的评价结果<sup>[18]</sup>。因此,引进“垂面距离”计算评价对象与理想解之间接近程度。

以 MN 连线为法向量,分别过点 C 的 A 面和点 D 的 B 面之间的距离即为 E、F 两点的“垂面距离”,如图 1 所示。由图 1 可知: 样本点 C 与正理想解向量  $M$  的“垂

面距离”近时与负理想解向量  $N$  的“垂面距离”远。

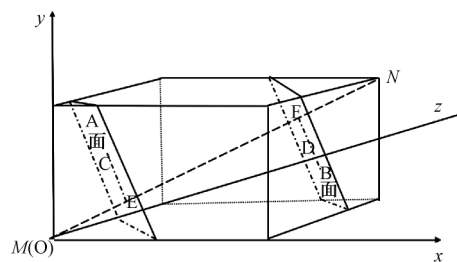


图 1 “垂面距离”示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vertical distance

#### 1.3.2 权重的确定

指标权重的确定对评价结果影响很大,一般有层次分析法、主成分分析法、特征值法、专家打分法等<sup>[19]</sup>。在评价过程中,对客观、公正性要求较高,因此采用客观法来计算指标的权重比较合适,即根据决策矩阵数据建立优化目标评价模型。采用加权法计算各评价因子权重,如式(1)所示:

$$B_j = x_{ij}/U'_j$$

$$U'_j = 1/k \sum_{t=1}^k U_{jt} \quad (1)$$

式中:  $B_j$  为第  $j$  个评价指标的权重;  $x_{ij}$  为第  $i$  个评价对象第  $j$  个的评价指标的实测值;  $U'_j$  为第  $j$  个评价指标各级评价标准的均值;  $k$  为评价标准等级数;  $U_{jt}$  为第  $j$  个评价指标第  $t$  级的评价标准。

由于权重必须落在  $[0, 1]$  区间内,所以需要权重进行归一化处理,如式(2)所示:

$$B'_j = B_j / \sum_{i=1}^m B_j, \sum_{i=1}^m B'_j = 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

#### 1.3.3 建立改进的 TOPSIS 综合评价模型

设有  $m$  个目标评价对象,  $n$  个评价指标,其中第  $i$  个评价对象的第  $j$  个评价指标的监测值为  $x_{ij}$ ,则初始判断矩阵  $V$  如式(3)所示:

$$V = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于各个指标的量纲可能不同,需要对初始判断矩阵进行标准化处理,将其统一为效益型指标(越大越优型)、成本型指标(越小越优型),得到标准化矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n}$  如式(4)所示:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 效益型指标:

$$r_{ij} = \begin{cases} (x_{ij} - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) & x_{j\max} \neq x_{j\min} \\ 1 & x_{j\max} = x_{j\min} \end{cases} \quad (5)$$

成本型指标:

$$r_{ij} = \begin{cases} (x_{j\max} - x_{ij}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) & x_{j\max} \neq x_{j\min} \\ 1 & x_{j\max} = x_{j\min} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$  分别为第  $j$  个指标值的最大值和最小值。

获取各评价指标的权重矩阵  $B_j$ , 构造加权判断矩阵  $F^*$  如式(7)所示:

$$F^* = RB_j = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ f_{m1} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据加权判断矩阵确定评价对象的正理想解如式(8)所示, 负理想解如式(9)所示:

正理想解:

$$F_j^+ = \begin{cases} \max(f_{ij}) & j \in J^* \\ \min(f_{ij}) & j \in J' \end{cases} \quad j = 1, 2, \cdots, n \quad (8)$$

负理想解:

$$F_j^- = \begin{cases} \min(f_{ij}) & j \in J^* \\ \max(f_{ij}) & j \in J' \end{cases} \quad j = 1, 2, \cdots, n \quad (9)$$

其中  $J^*$  为效益型指标集,  $J'$  为成本型指标集。根据评价目标和评价指标确定矩阵  $R$  为效益型指标或成本型指标。当矩阵  $R$  为效益型指标时, 其理想的正理想向量为  $F^+ = (1, 1, \cdots, 1)$ , 负理想向量为  $F^- = (0, 0, \cdots, 0)$ ; 当矩阵  $R$  为成本型指标时, 其理想的正理想向量为  $F^+ = (0, 0, \cdots, 0)$ , 负理想向量为  $F^- = (1, 1, \cdots, 1)$ 。

计算各评价方案之间的“垂面距离”, 依照距离的远近进行排序, 形成决策依据。假设图 1 中点 C, D, M, N 对应的向量分别是  $c, d, m, n$ , 则点 C 和点 D 的“垂面距离”如式(10)所示:

$$D = \frac{|(m - n) \cdot (c - d)|}{\|m - n\|} \quad (10)$$

式中:  $\cdot$  为向量的点乘,  $| \cdot |$  为向量的绝对值,  $\| \cdot \|$  为向量的范数。由于评价对象的正理想解与负理想解之间的距离  $\|m - n\|$  是常数, 所以只需要计算  $| (m - n) \cdot (c - d) |$ 。各个评价对象距离正理想解的“垂面距离”如式(11)所示:

$$D = | (m - n) \cdot (c - d) | \quad (11)$$

将判断加权矩阵平移至正理想解处从而简化计算, 平移矩阵如式(12)所示:

$$Q_{ij} = f_{ij} - F_j^+ \quad (12)$$

正理想解即为  $\{0, 0, \cdots, 0\}$ , 负理想解即为  $\{r_j^- | j = 1, 2, \cdots, n\}$ ,  $q_{ij} = q_{kj}$ , 且  $q_{kj}$  满足  $|q_{kj}| \geq |q_{ij}|, 1 \leq k \leq m$ 。由此可得式(13):

$$D = | (h - k) \cdot (h - q_i) | \quad (13)$$

其中  $h$  为平移后的正理想解, 即为  $\{0, 0, \cdots, 0\}$ ;  $q_i$  为平移后矩阵的第  $i$  个评价对象;  $k$  为平移后的负理想解, 对式(11)化简可得式(14):

$$D = | k \cdot q_i | = | r^- \cdot q_i | = \sum_{j=1}^n (r_j^- q_i) \quad (14)$$

## 2 实例分析

### 2.1 确定测评指标

应用上述改进的 TOPSIS 评价方法, 对大气环境质量监测结果进行综合评价。任意选取 6 个时空分布无特殊要求的大气环境监测点, 分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ 、 $A_6$ ; 任意选取沉降、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $CO$  4 个评价指标, 由此构成评价因子初始矩阵。6 个监测点的主要污染物日均质量浓度统计数据<sup>[20]</sup>如表 1 所示。

表 1 各监测点的主要污染物日均质量浓度

Table 1 Main pollutant consistence of sample point

测点位	检测项目日均质量浓度			
	沉降 / ( $t \cdot km^{-3} \cdot 月^{-1}$ )	$PM_{10}$ / ( $mg \cdot m^{-3}$ )	$SO_2$ / ( $mg \cdot m^{-3}$ )	$CO$ / ( $mg \cdot m^{-3}$ )
$A_1$	10.2	0.14	0.13	4.2
$A_2$	16.4	0.18	0.28	5.5
$A_3$	25.7	0.52	0.32	5.8
$A_4$	11.5	0.11	0.12	2.8
$A_5$	2.6	0.05	0.02	1.8
$A_6$	8.2	0.03	0.02	0.9

空气质量评价标准等级依据中华人民共和国国家标准 GB 3095—2012《环境空气质量标准》确定为 5 个标准等级, 见表 2。

### 2.2 TOPSIS 评价

应用式(1)、式(2)加权法确定权重, 排除了主观定权的随意性, 即使评价指标较多, 也可准确判定权重, 使评价更具客观性。计算得各评价指标权重结果如表 3 所示。

将表 1 污染物实测数据与表 2 各项污染物浓度限值一起按式(3)构成增广型特征矩阵。

表2 各项污染物浓度限值

Table 2 The monitoring index of pollutant consistence				
项目	污染物质量浓度限值			
	沉降/ ( $\text{t}\cdot\text{km}^{-3}\cdot\text{月}^{-1}$ )	$\text{PM}_{10}$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\text{SO}_2$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	CO / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
I 级标准	6	0.10	0.10	2
II 级标准	12	0.15	0.15	4
III 级标准	20	0.25	0.25	6
IV 级标准	40	0.50	0.50	12
V 级标准	80	0.90	0.90	20

表3 各监测样本的目标权重

Table 3 The objective weight of monitoring sample				
测点位	各个检测项目权重			
	沉降/ ( $\text{t}\cdot\text{km}^{-3}\cdot\text{月}^{-1}$ )	$\text{PM}_{10}$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\text{SO}_2$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	CO / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
A <sub>1</sub>	0.186	0.279	0.259	0.276
A <sub>2</sub>	0.190	0.227	0.354	0.229
A <sub>3</sub>	0.186	0.410	0.253	0.151
A <sub>4</sub>	0.247	0.257	0.280	0.216
A <sub>5</sub>	0.156	0.326	0.131	0.387
A <sub>6</sub>	0.486	0.194	0.129	0.191

利用式(4)、式(5)构造标准化决策矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$  这里统一为效益型指标 按照式(7)计算加权的归一化决策矩阵  $F_{ij} = (f_{ij})_{m \times n}$  结果见表4和表5。

$$x_{ij} = \begin{pmatrix} 10.20 & 0.14 & 0.13 & 4.20 \\ 16.40 & 0.18 & 0.28 & 5.50 \\ 25.70 & 0.52 & 0.32 & 5.80 \\ 11.50 & 0.11 & 0.12 & 2.80 \\ 2.60 & 0.05 & 0.02 & 1.80 \\ 8.20 & 0.03 & 0.02 & 0.90 \\ 6.00 & 0.10 & 0.10 & 2.00 \\ 12.00 & 0.15 & 0.15 & 4.00 \\ 20.00 & 0.25 & 0.25 & 6.00 \\ 40.00 & 0.50 & 0.50 & 12.00 \\ 80.00 & 0.90 & 0.90 & 20.00 \end{pmatrix} \quad (15)$$

表4 各监测样本的归一化结果

Table 4 The normalized results of monitoring sample				
测点位	检测项目日均质量浓度			
	沉降/ ( $\text{t}\cdot\text{km}^{-3}\cdot\text{月}^{-1}$ )	$\text{PM}_{10}$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\text{SO}_2$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	CO / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
A <sub>1</sub>	0.018	0.035	0.032	0.048
A <sub>2</sub>	0.034	0.039	0.104	0.055
A <sub>3</sub>	0.055	0.231	0.086	0.039
A <sub>4</sub>	0.028	0.024	0.032	0.021
A <sub>5</sub>	0.000	0.007	0.000	0.018
A <sub>6</sub>	0.035	0.000	0.000	0.000

表5 各项污染物浓度限值归一化结果

Table 5 The normalized results of the monitoring index				
项目	污染物质量浓度限值			
	沉降/ ( $\text{t}\cdot\text{km}^{-3}\cdot\text{月}^{-1}$ )	$\text{PM}_{10}$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\text{SO}_2$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	CO / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
I 级标准	0.008	0.025	0.028	0.012
II 级标准	0.025	0.038	0.041	0.039
III 级标准	0.047	0.072	0.074	0.060
IV 级标准	0.100	0.153	0.155	0.130
V 级标准	0.230	0.282	0.282	0.206

按式(8)求解归一化决策矩阵的正理想向量  $J^*$  和负理想向量  $J'$ , 分别为  $J^* = (0.230 \ 0.282 \ 0.282 \ 0.206)$   $J' = (0.000 \ 0.000 \ 0.000 \ 0.000)$ 。

计算各评价对象距离理想向量的垂面距离,为了计算简便 按式(14)将加权矩阵平移至正理想解处,由此即可得6个监测点的评价指标距离正理想解的“垂面距离”的结果 见表6。

表6 各监测点大气监测指标之间的“垂面距离”

Table 6 The vertical distance of monitoring sample						
监测点位	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
垂面距离	0.223	0.195	0.143	0.228	0.25	0.247

依照效益型指标越大越优的特点对各监测点大气监测指标的“垂面距离”进行取优排序,可得测点  $D_5 > D_6 > D_4 > D_1 > D_2 > D_3$ 。

GB 3095—2012中确定的5个评价指标限值作为增广矩阵参与本次运算,评价指标限值距离正理想解的“垂面距离”的结果见表7。

表7 大气环境监测指标的“垂面距离”

Table 7 The vertical distance of monitoring index					
监测点位	I	II	III	IV	V
垂面距离	0.235	0.218	0.190	0.118	0.000

根据表6与表7进行取优排序,从而确定评价等级,各个监测点的大气环境质量评价结果和采用物元分析法、灰色聚类法、RBF网络法和遗传集对分析法<sup>[20-21]</sup>的评价结果如表8所示。

表8 不同方法的空气质量评价结果

Table 8 The evaluation result of atmosphere quality in different methods					
测点位	改进 TOPSIS 方法	物元分析法	灰色聚类法	RBF 网络法	遗传-集对方法
A <sub>1</sub>	II	II	II	II	II
A <sub>2</sub>	III	III	III	III	III
A <sub>3</sub>	IV	IV	IV	IV	IV
A <sub>4</sub>	II	II	II	II	II
A <sub>5</sub>	I	I	I	I	I
A <sub>6</sub>	I	I	I	I	I

由表8可知,采用改进的TOPSIS方法对空气质量所得评价结果与物元分析法、灰色聚类法、RBF网络、和遗传集对分析法的评价结果完全一致。监测点 $A_5$ 和 $A_6$ 属于Ⅰ级标准, $A_4$ 和 $A_1$ 属于Ⅱ级标准, $A_2$ 为Ⅲ级标准, $A_3$ 空气质量最差为Ⅳ级标准,可表明运用改进的TOPSIS方法对大气环境质量评价是切实可行的。

### 3 结果分析与结论

1) 通过实例证实,采用客观赋权法对评价对象进行赋权,且以“垂面距离”代替传统的“欧氏距离”对大气环境质量进行综合评价,评价结果符合实际情况。

2) 改进的TOPSIS方法对评价对象、评价指标多少均无严格限制,数学计算较为简单,结果量化客观。

3) 运用改进的TOPSIS方法可以合理评估反应区域大气环境质量情况,为大气环境质量综合评价提供一种新方法。

#### 参考文献

- [1] 王伟,解佳宁,路宗敏,等. 天津市大气能见度与空气污染物关系分析及控制措施[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(12): 48-53.
- [2] 王帅,王瑞斌,刘冰,等. 重点区域环境空气质量监测方案与评价方法探讨[J]. 环境与可持续发展, 2011, 5(5): 24-27.
- [3] 童志权. 大气环境影响评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [4] 徐明德,王雪芹. 晋城市大气环境质量模糊评价[J]. 科技情报开发与经济, 2008, 18(34): 93-101.
- [5] 吴智诚,张江山,陈盛. TOPSIS法在水环境质量综合评价中的应用[J]. 水资源保护, 2007, 23(2): 10-12.
- [6] 卓倩,杨文卿,钱庆荣,等. 层次分析法在福州市大气环境质量评价中的应用[J]. 福建师范大学学报. 自然科学版, 2012, 28(1): 60-64, 65.
- [7] 张虹霓,孙世群. 基于BP神经网络的大气环境质量评价模型[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(31): 17656-17657, 17664.
- [8] 童英伟,刘志斌,初玲玲. 基于模糊综合评价的大气环境质量评价[J]. 辽宁工程技术大学学报. 自然科学版, 2008, 27(S1): 311-313.
- [9] 张云海,马雁军,孙财涛,等. 灰色聚类评价在经济区大气环境质量评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S1): 426-428.
- [10] 郭绍英,张江山,郑育毅. 集对分析法在大气环境质量评价中的应用[J]. 环境工程, 2009, 27(4): 113-116, 42.
- [11] 张洪,张燕. 基于加权TOPSIS法的旅游资源区竞争力的比较研究: 以长江三角洲为例[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(5): 500-505.
- [12] 陈强,杨晓华. 基于熵权的TOPSIS法及其在水环境质量综合评价中的应用[J]. 环境工程, 2007, 25(4): 75-77.
- [13] 徐存东,翟东辉,张硕等. 改进的TOPSIS综合评价模型在河道整治方案优选中的应用[J]. 河海大学学报. 自然科学版, 2013, 41(3): 222-228.
- [14] Mahmoud A. Abo Sinna, Azza H Amer, et al. Extensions of TOPSIS for large scale multi-objective non-linear programming problems with block angular structure[J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32(3): 292-302.
- [15] 王慧霞. 县域经济竞争力及其TOPSIS评价模型研究[J]. 生产力研究, 2007(5): 17-19, 22.
- [16] 华小义,谭景信. 基于“垂直”距离的TOPSIS法-正交投影法[J]. 系统工程理论与实践, 2004(1): 114-119.
- [17] 余雁,梁燦. 多指标决策TOPSIS方法的进一步探讨[J]. 系统工程, 2003, 21(2): 98-101.
- [18] 屈吉鸿,陈南祥,黄强,等. 改进的逼近理想解在地下水资源承载力评价中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1309-1314.
- [19] 王金叶,程道品. 广西生态环境评价指标体系及模糊评价[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 5-8.
- [20] 彭馥艳,丁辉,赵源. 基于RBF网络的空气质量评价[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 154-155, 159.
- [21] 邬敏,李祚泳,刘智勇,等. 基于遗传集对分析的空气质量评价[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(2): 166-171.

第一作者: 王玲玲(1986-),女,硕士研究生,从事环境影响与评价等方面研究. serena0612@foxmail.com

通讯作者: 卢晓宁(1980-),女,博士,副教授,研究方向为环境影响与评价等方面. lxn@cuit.edu.cn